

LABORATOIRE DE PHYSIQUE I : METROLOGIE

Iva Tkalcec Vâju, Daniele Mari

Travaux Pratiques
seront donnés dans la salle

PH CI 425

plan.epfl.ch

Toute la documentation du cours sera
accessible online à l'adresse

moodle.epfl.ch

Horaire

La video et les slides du cours de la semaine suivante sont mis sur Moodle le vendredi. Leur visionnement est obligatoire avant le cours. Les heures de présence seront ainsi axées sur la pratique !

Mardi

Groupe A 10h15 -12h15

Groupe B 15h00 -17h00 ?

Mercredi

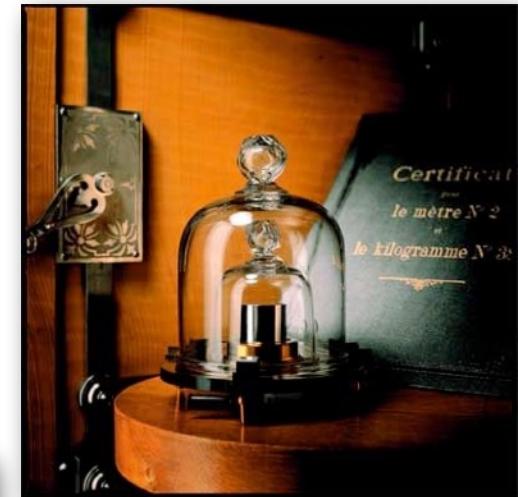
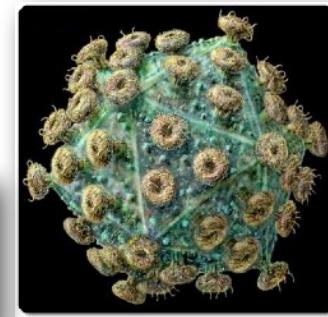
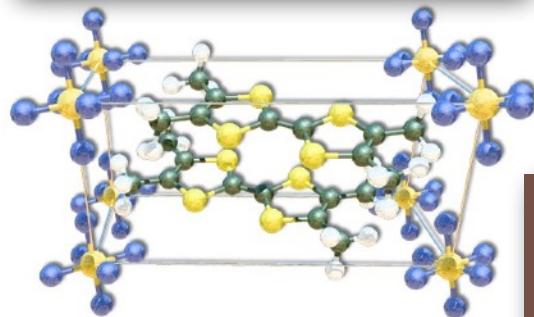
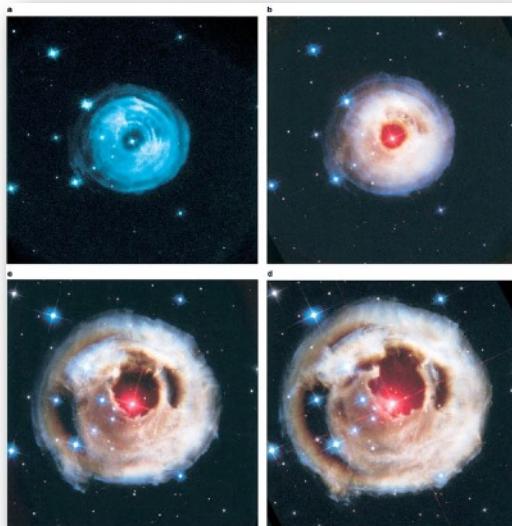
Groupe C 11h15 - 13h15

Groupe D 14h00 -16h00

Ordres de grandeur et système d'unités

Daniele Mari

EPFL



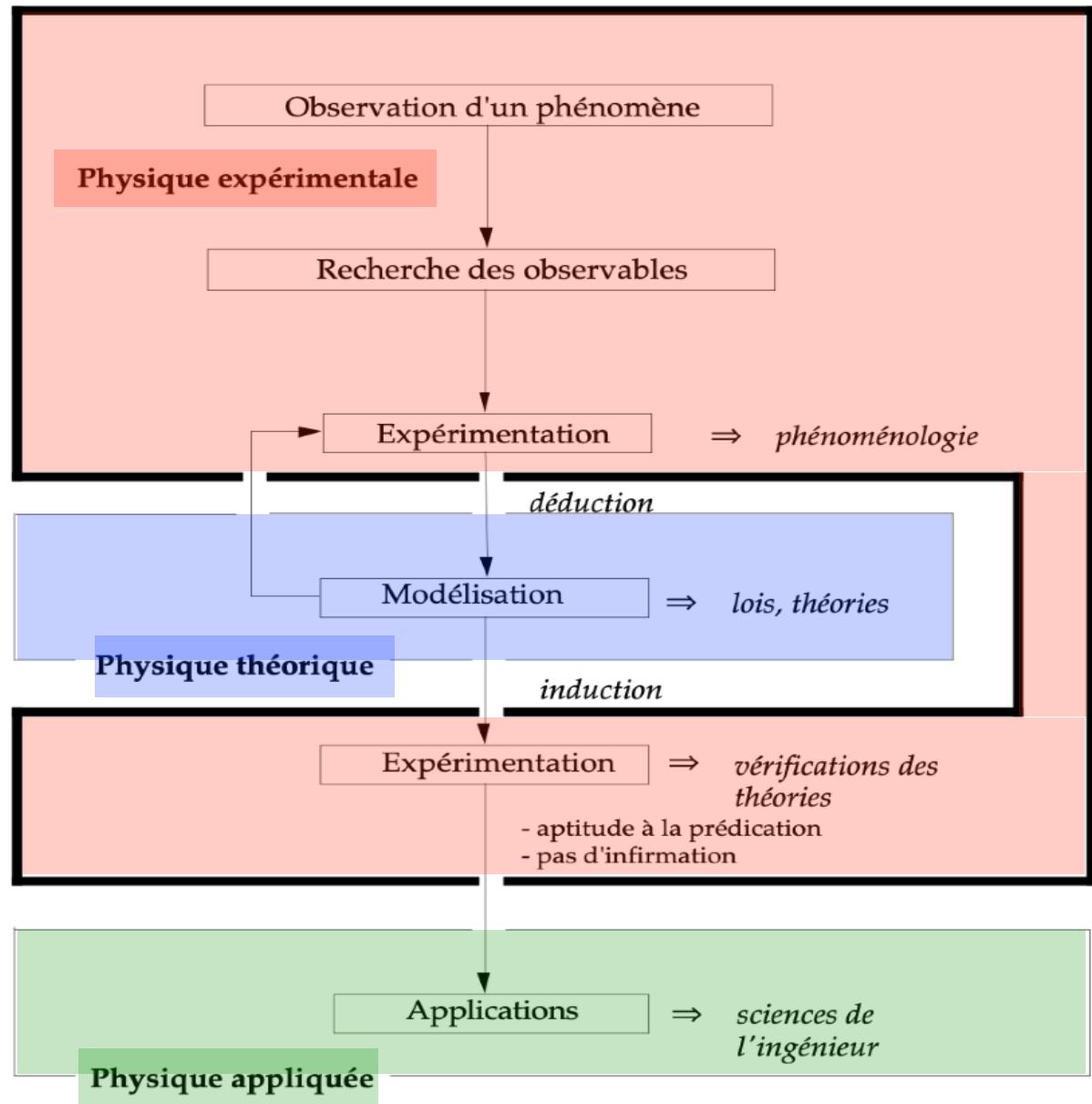
Qu'est-ce que la physique?

La démarche du physicien:

Définition de la physique:

φύσις = nature

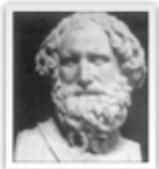
Larousse: science qui étudie les propriétés de la matière, de l'espace et du temps, et qui établit les lois qui rendent compte des phénomènes naturels.



La physique d'hier (<1900)



Ampere



Archimede



Avogadro



Bernouilli



Biot



Boltzman



Boyle



Celsius



Copernic



Coulomb



Dalton



Faraday



Foucault



Fresnel



Galilee



Galvani



Gay-Lussac



Hertz



Hooke



Huygens



Joule



Kelvin



Mariotte



Maxwell



Navier



Newton



Oersted



Ohm



Pascal



Rötgen



Savart



Stockes



Tesla



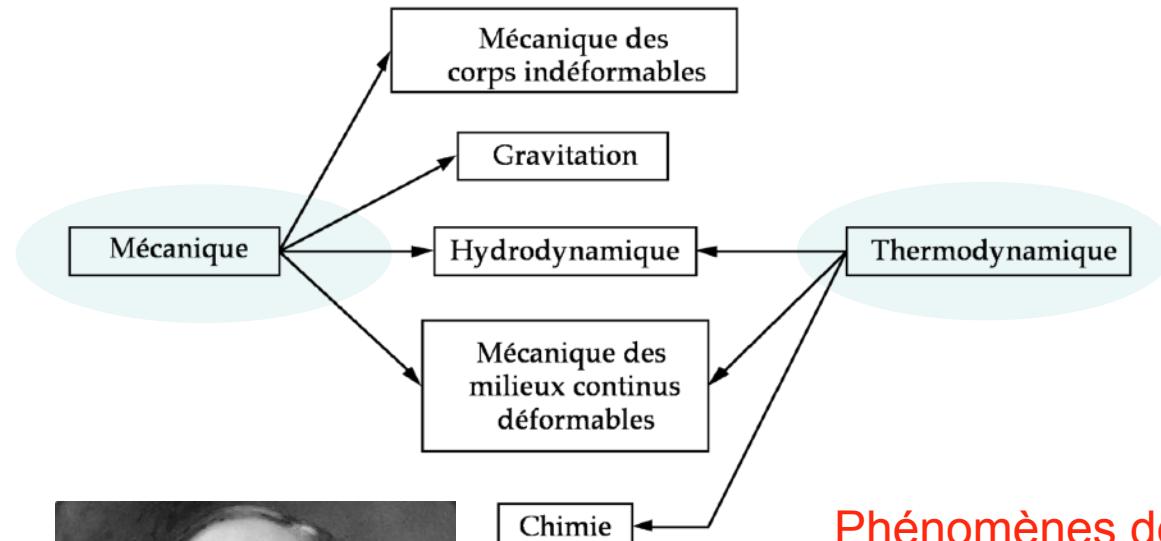
Volta



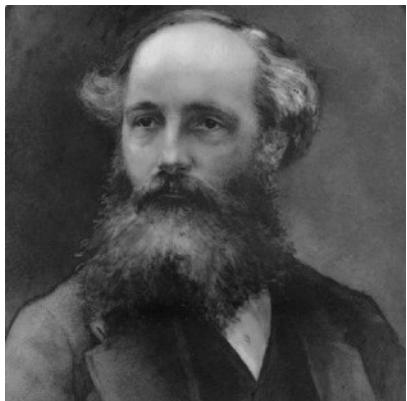
Watt

La physique *d'hier* (<1900)

Phénomènes de nature corpusculaire

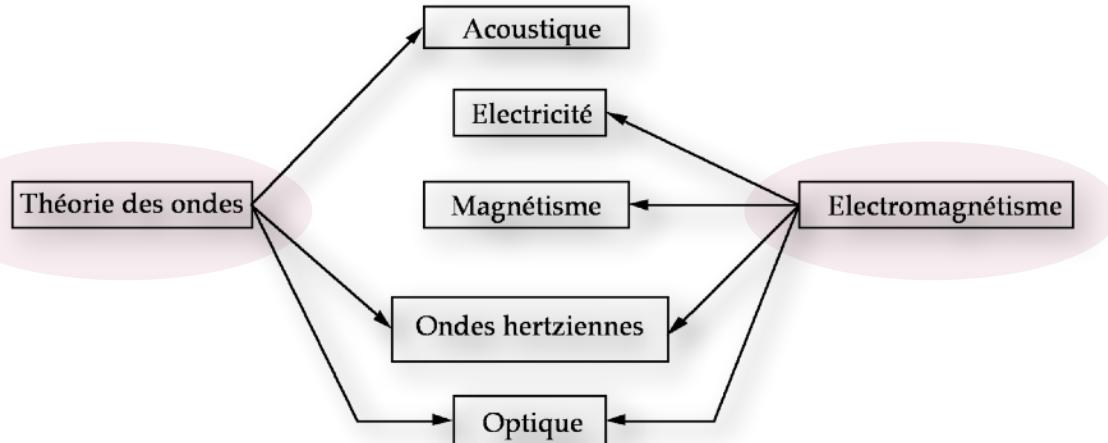


Isaac Newton

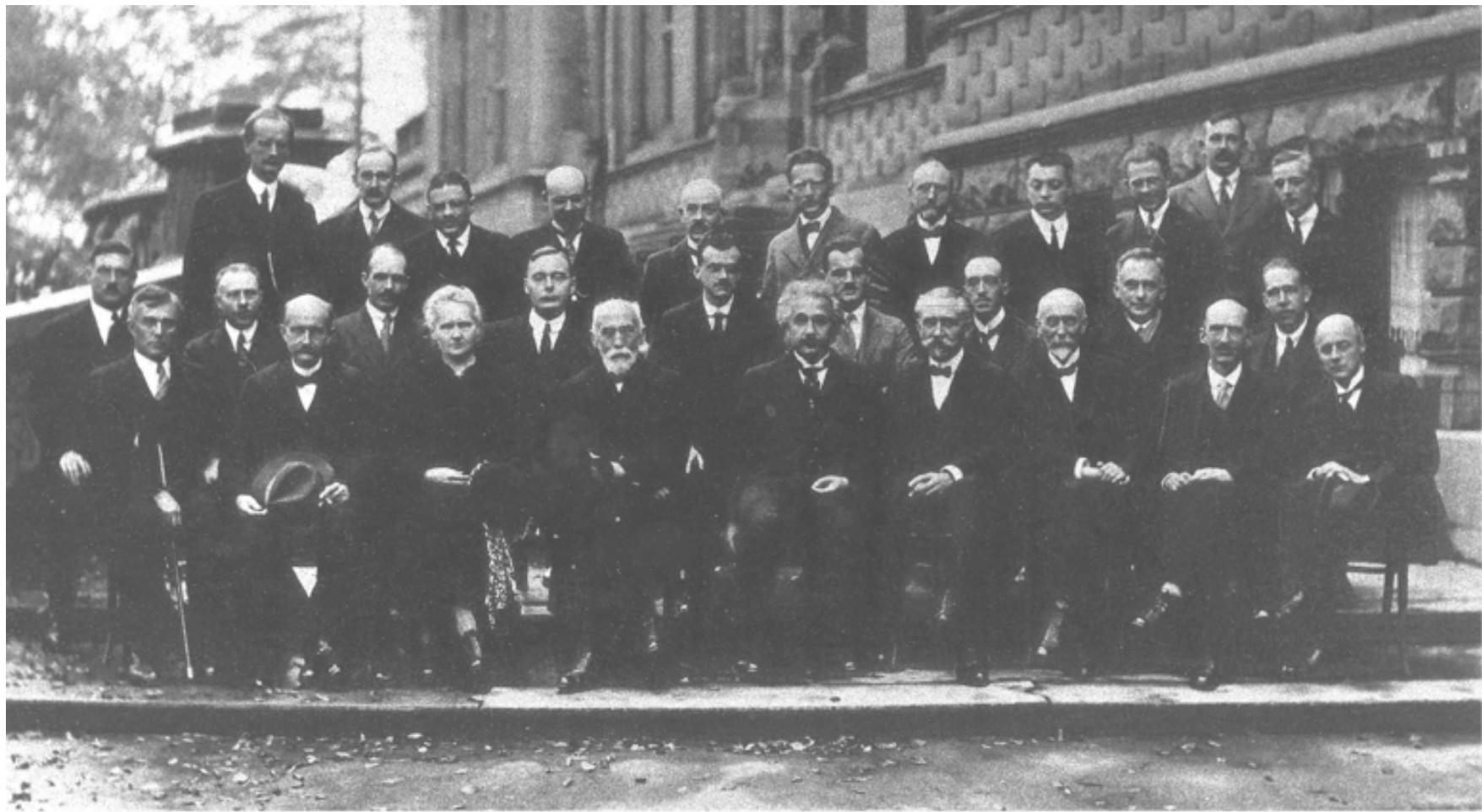


James Maxwell

Phénomènes de nature ondulatoire



La physique d'aujourd'hui (>1900)



A. PICCARD

E. HENRIOT

Ed. HERZEN

Th. DE DONDER

E. SCHROEDINGER

R. H. FOWLER

L. BRILLOUIN

P. DEBYE

M. KNUDSEN

W. L. BRAGG

P. EHRENFEST

H. A. KRAMERS

P. A. M. DIRAC

A. H. COMPTON

E. VERSCHAFFELT

W. PAULI

W. HEISENBERG

L. BRILLOUIN

L. LANGMEIR

M. PLANCK

MADAME CURIE

H. A. LORENTZ

A. EINSTEIN

P. LANGEVIN

CH. E. GUYE

C. T. R. WILSON

O. W. RICHARDSON

ABSENTS : SIR W. H. BRAGG, M. H. DESLANDRES ET E. VAN AUBEL

La physique d'aujourd'hui (>1900)

Mécanique des très grandes vitesses

Relativité restreinte

Macrocosme

Astrophysique

Cosmologie



Einstein



Planck

Gravitation universelle

Relativité générale

Microcosme

Physique des particules



Bohr



De Broglie

Dualité ondes-corpuscules

Physique quantique

Physique nucléaire



Schrödinger

Physique atomique



Heisenberg

Dirac

Pauli

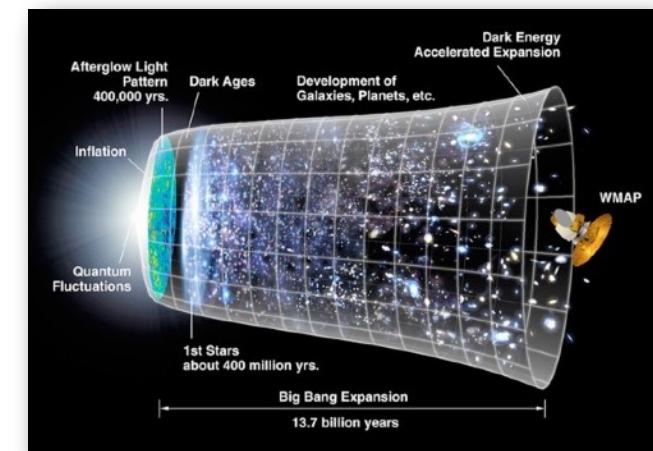
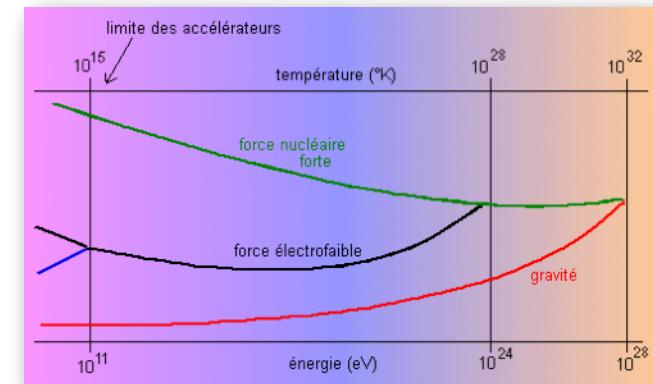
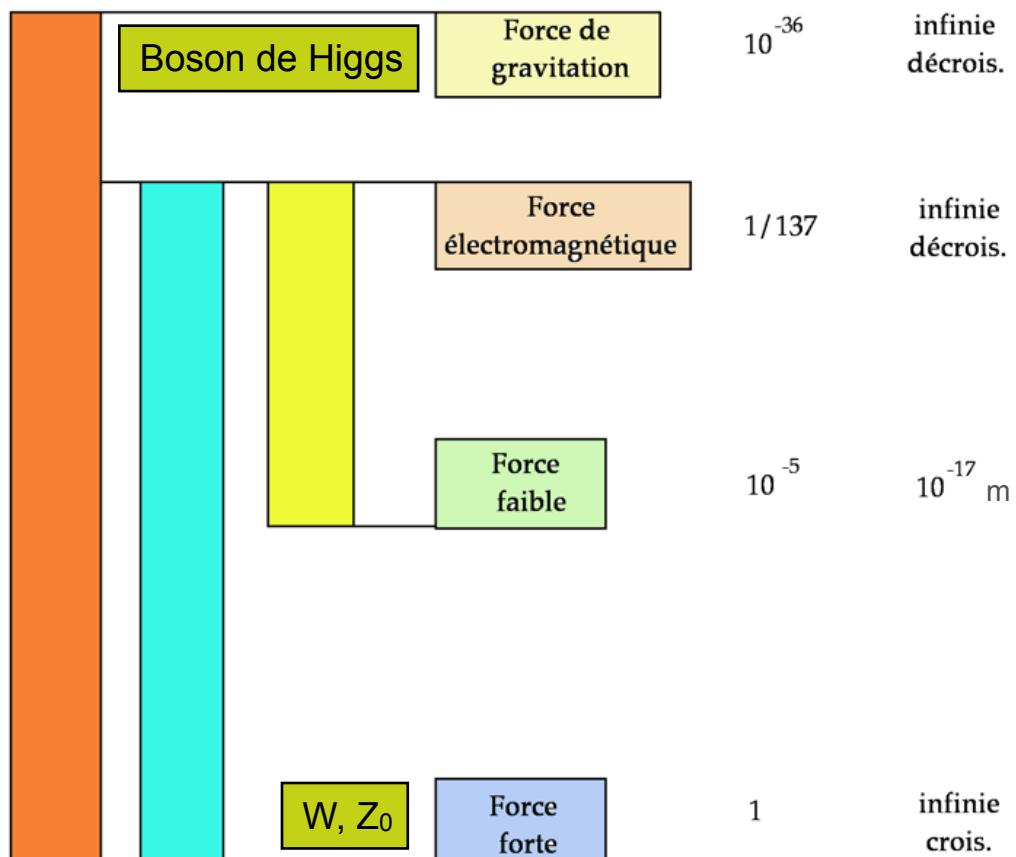
La physique de demain ? (c'est déjà aujourd'hui)

Unifications

Champs de force

Intensité

Portée



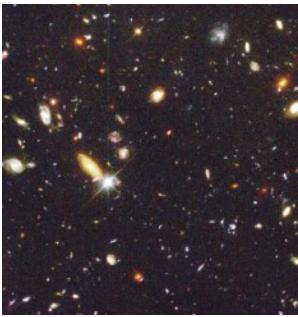
Théories unifiées des champs

\Leftarrow Grands problèmes actuels \Rightarrow

Cosmologie (naissance de l'Univers)

Ordres de grandeur en physique

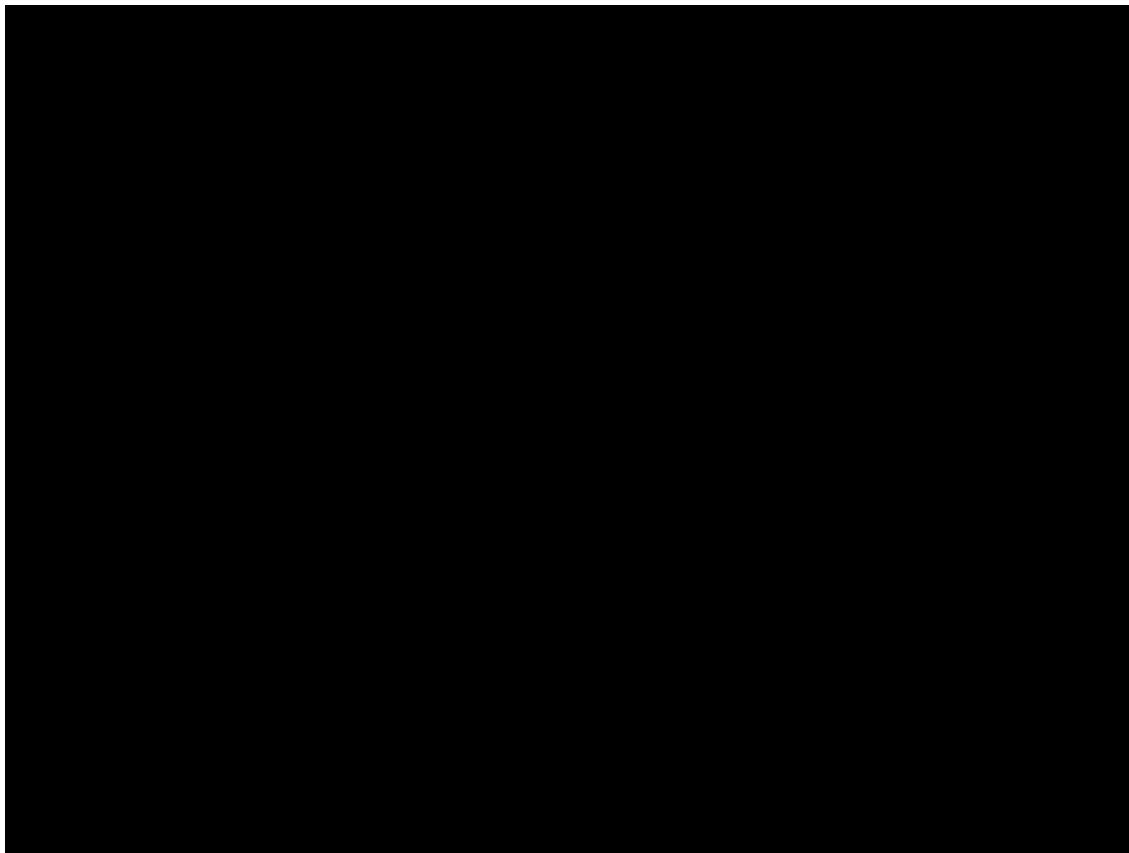
Le macrocosme: astronomie, astrophysique, cosmologie

10^{11} Galaxies	10^{11} Etoiles		
Univers	Galaxies	Systèmes	Objets célestes
			 
$\phi_{Univ} \cong 10^{26} \text{ m}$	$\phi_{gal} \cong 10^{21} \text{ m}$	$r_{orbt} \cong 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ [Tm]	$\phi \cong 10^3 \text{ m}$ $6 \cdot 10^6 \text{ m}$ $7 \cdot 10^8 \text{ m}$ [km] [Mm] [Gm]
$\lambda_{Planck} \cong 10^{-35} \text{ m}$			

force de gravitation

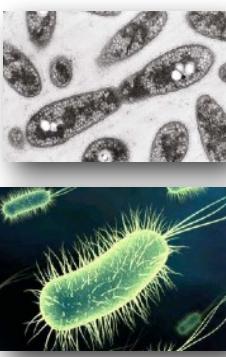
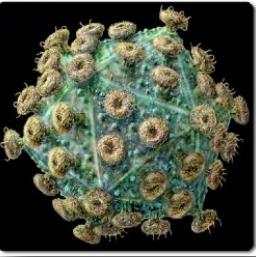
?? Forte 'Thermique' EM

Powers of Ten™ (1977)



Ordres de grandeur en physique

Le biocosme: biologie, biochimie, biophysique

10^{51} Atomes $9 \cdot 10^9$ Humains	10^{28} Atomes 10^{12} Cellules	10^{12} Atomes	10^{10} Atomes	10^8-10^{10} Atomes
	 évolution			
$\phi_{ter} = 6 \cdot 10^6$ m [Mm]	$h = 1.75$ m [m]	$\phi_{cel} \cong 10^{-6}$ m [μ m]	$d_{vir} \cong 10^{-7}$ m > [nm]	$l_{DNA} \cong 10^{-7}$ m > [nm]
 force électromagnétique (EM)				

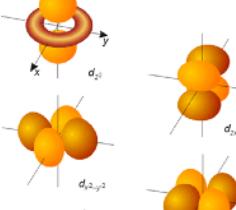
Ordres de grandeur en physique

Le microcosme à l'échelle atomique: physique atomique

Periodic Table for the *Table of Isotopes* (1999)

1 (IA)	Hydrogen	Helium	18 (VIIIA)
H	$^{226}_{1}H$ $^{230}_{1}H$ $^{234}_{1}H$ $^{238}_{1}H$	$^{3}_{2}He$ $^{4}_{2}He$ $^{3}_{3}He$	$^{212}_{1}He$ $^{224}_{1}He$ $^{226}_{1}He$ $^{228}_{1}He$ $^{230}_{1}He$ $^{232}_{1}He$ $^{234}_{1}He$ $^{236}_{1}He$ $^{238}_{1}He$ $^{240}_{1}He$ $^{242}_{1}He$ $^{244}_{1}He$ $^{246}_{1}He$ $^{248}_{1}He$ $^{250}_{1}He$ $^{252}_{1}He$ $^{254}_{1}He$ $^{256}_{1}He$ $^{258}_{1}He$ $^{260}_{1}He$ $^{262}_{1}He$ $^{264}_{1}He$ $^{266}_{1}He$ $^{268}_{1}He$ $^{270}_{1}He$ $^{272}_{1}He$ $^{274}_{1}He$ $^{276}_{1}He$ $^{278}_{1}He$ $^{280}_{1}He$ $^{282}_{1}He$ $^{284}_{1}He$ $^{286}_{1}He$ $^{288}_{1}He$ $^{290}_{1}He$ $^{292}_{1}He$ $^{294}_{1}He$ $^{296}_{1}He$ $^{298}_{1}He$ $^{300}_{1}He$ $^{302}_{1}He$ $^{304}_{1}He$ $^{306}_{1}He$ $^{308}_{1}He$ $^{310}_{1}He$ $^{312}_{1}He$ $^{314}_{1}He$ $^{316}_{1}He$ $^{318}_{1}He$ $^{320}_{1}He$ $^{322}_{1}He$ $^{324}_{1}He$ $^{326}_{1}He$ $^{328}_{1}He$ $^{330}_{1}He$ $^{332}_{1}He$ $^{334}_{1}He$ $^{336}_{1}He$ $^{338}_{1}He$ $^{340}_{1}He$ $^{342}_{1}He$ $^{344}_{1}He$ $^{346}_{1}He$ $^{348}_{1}He$ $^{350}_{1}He$ $^{352}_{1}He$ $^{354}_{1}He$ $^{356}_{1}He$ $^{358}_{1}He$ $^{360}_{1}He$ $^{362}_{1}He$ $^{364}_{1}He$ $^{366}_{1}He$ $^{368}_{1}He$ $^{370}_{1}He$ $^{372}_{1}He$ $^{374}_{1}He$ $^{376}_{1}He$ $^{378}_{1}He$ $^{380}_{1}He$ $^{382}_{1}He$ $^{384}_{1}He$ $^{386}_{1}He$ $^{388}_{1}He$ $^{390}_{1}He$ $^{392}_{1}He$ $^{394}_{1}He$ $^{396}_{1}He$ $^{398}_{1}He$ $^{400}_{1}He$ $^{402}_{1}He$ $^{404}_{1}He$ $^{406}_{1}He$ $^{408}_{1}He$ $^{410}_{1}He$ $^{412}_{1}He$ $^{414}_{1}He$ $^{416}_{1}He$ $^{418}_{1}He$ $^{420}_{1}He$ $^{422}_{1}He$ $^{424}_{1}He$ $^{426}_{1}He$ $^{428}_{1}He$ $^{430}_{1}He$ $^{432}_{1}He$ $^{434}_{1}He$ $^{436}_{1}He$ $^{438}_{1}He$ $^{440}_{1}He$ $^{442}_{1}He$ $^{444}_{1}He$ $^{446}_{1}He$ $^{448}_{1}He$ $^{450}_{1}He$ $^{452}_{1}He$ $^{454}_{1}He$ $^{456}_{1}He$ $^{458}_{1}He$ $^{460}_{1}He$ $^{462}_{1}He$ $^{464}_{1}He$ $^{466}_{1}He$ $^{468}_{1}He$ $^{470}_{1}He$ $^{472}_{1}He$ $^{474}_{1}He$ $^{476}_{1}He$ $^{478}_{1}He$ $^{480}_{1}He$ $^{482}_{1}He$ $^{484}_{1}He$ $^{486}_{1}He$ $^{488}_{1}He$ $^{490}_{1}He$ $^{492}_{1}He$ $^{494}_{1}He$ $^{496}_{1}He$ $^{498}_{1}He$ $^{500}_{1}He$ $^{502}_{1}He$ $^{504}_{1}He$ $^{506}_{1}He$ $^{508}_{1}He$ $^{510}_{1}He$ $^{512}_{1}He$ $^{514}_{1}He$ $^{516}_{1}He$ $^{518}_{1}He$ $^{520}_{1}He$ $^{522}_{1}He$ $^{524}_{1}He$ $^{526}_{1}He$ $^{528}_{1}He$ $^{530}_{1}He$ $^{532}_{1}He$ $^{534}_{1}He$ $^{536}_{1}He$ $^{538}_{1}He$ $^{540}_{1}He$ $^{542}_{1}He$ $^{544}_{1}He$ $^{546}_{1}He$ $^{548}_{1}He$ $^{550}_{1}He$ $^{552}_{1}He$ $^{554}_{1}He$ $^{556}_{1}He$ $^{558}_{1}He$ $^{560}_{1}He$ $^{562}_{1}He$ $^{564}_{1}He$ $^{566}_{1}He$ $^{568}_{1}He$ $^{570}_{1}He$ $^{572}_{1}He$ $^{574}_{1}He$ $^{576}_{1}He$ $^{578}_{1}He$ $^{580}_{1}He$ $^{582}_{1}He$ $^{584}_{1}He$ $^{586}_{1}He$ $^{588}_{1}He$ $^{590}_{1}He$ $^{592}_{1}He$ $^{594}_{1}He$ $^{596}_{1}He$ $^{598}_{1}He$ $^{600}_{1}He$ $^{602}_{1}He$ $^{604}_{1}He$ $^{606}_{1}He$ $^{608}_{1}He$ $^{610}_{1}He$ $^{612}_{1}He$ $^{614}_{1}He$ $^{616}_{1}He$ $^{618}_{1}He$ $^{620}_{1}He$ $^{622}_{1}He$ $^{624}_{1}He$ $^{626}_{1}He$ $^{628}_{1}He$ $^{630}_{1}He$ $^{632}_{1}He$ $^{634}_{1}He$ $^{636}_{1}He$ $^{638}_{1}He$ $^{640}_{1}He$ $^{642}_{1}He$ $^{644}_{1}He$ $^{646}_{1}He$ $^{648}_{1}He$ $^{650}_{1}He$ $^{652}_{1}He$ $^{654}_{1}He$ $^{656}_{1}He$ $^{658}_{1}He$ $^{660}_{1}He$ $^{662}_{1}He$ $^{664}_{1}He$ $^{666}_{1}He$ $^{668}_{1}He$ $^{670}_{1}He$ $^{672}_{1}He$ $^{674}_{1}He$ $^{676}_{1}He$ $^{678}_{1}He$ $^{680}_{1}He$ $^{682}_{1}He$ $^{684}_{1}He$ $^{686}_{1}He$ $^{688}_{1}He$ $^{690}_{1}He$ $^{692}_{1}He$ $^{694}_{1}He$ $^{696}_{1}He$ $^{698}_{1}He$ $^{700}_{1}He$ $^{702}_{1}He$ $^{704}_{1}He$ $^{706}_{1}He$ $^{708}_{1}He$ $^{710}_{1}He$ $^{712}_{1}He$ $^{714}_{1}He$ $^{716}_{1}He$ $^{718}_{1}He$ $^{720}_{1}He$ $^{722}_{1}He$ $^{724}_{1}He$ $^{726}_{1}He$ $^{728}_{1}He$ $^{730}_{1}He$ $^{732}_{1}He$ $^{734}_{1}He$ $^{736}_{1}He$ $^{738}_{1}He$ $^{740}_{1}He$ $^{742}_{1}He$ $^{744}_{1}He$ $^{746}_{1}He$ $^{748}_{1}He$ $^{750}_{1}He$ $^{752}_{1}He$ $^{754}_{1}He$ $^{756}_{1}He$ $^{758}_{1}He$ $^{760}_{1}He$ $^{762}_{1}He$ $^{764}_{1}He$ $^{766}_{1}He$ $^{768}_{1}He$ $^{770}_{1}He$ $^{772}_{1}He$ $^{774}_{1}He$ $^{776}_{1}He$ $^{778}_{1}He$ $^{780}_{1}He$ $^{782}_{1}He$ $^{784}_{1}He$ $^{786}_{1}He$ $^{788}_{1}He$ $^{790}_{1}He$ $^{792}_{1}He$ $^{794}_{1}He$ $^{796}_{1}He$ $^{798}_{1}He$ $^{800}_{1}He$ $^{802}_{1}He$ $^{804}_{1}He$ $^{806}_{1}He$ $^{808}_{1}He$ $^{810}_{1}He$ $^{812}_{1}He$ $^{814}_{1}He$ $^{816}_{1}He$ $^{818}_{1}He$ $^{820}_{1}He$ $^{822}_{1}He$ $^{824}_{1}He$ $^{826}_{1}He$ $^{828}_{1}He$ $^{830}_{1}He$ $^{832}_{1}He$ $^{834}_{1}He$ $^{836}_{1}He$ $^{838}_{1}He$ $^{840}_{1}He$ $^{842}_{1}He$ $^{844}_{1}He$ $^{846}_{1}He$ $^{848}_{1}He$ $^{850}_{1}He$ $^{852}_{1}He$ $^{854}_{1}He$ $^{856}_{1}He$ $^{858}_{1}He$ $^{860}_{1}He$ $^{862}_{1}He$ $^{864}_{1}He$ $^{866}_{1}He$ $^{868}_{1}He$ $^{870}_{1}He$ $^{872}_{1}He$ $^{874}_{1}He$ $^{876}_{1}He$ $^{878}_{1}He$ $^{880}_{1}He$ $^{882}_{1}He$ $^{884}_{1}He$ $^{886}_{1}He$ $^{888}_{1}He$ $^{890}_{1}He$ $^{892}_{1}He$ $^{894}_{1}He$ $^{896}_{1}He$ $^{898}_{1}He$ $^{900}_{1}He$ $^{902}_{1}He$ $^{904}_{1}He$ $^{906}_{1}He$ $^{908}_{1}He$ $^{910}_{1}He$ $^{912}_{1}He$ $^{914}_{1}He$ $^{916}_{1}He$ $^{918}_{1}He$ $^{920}_{1}He$ $^{922}_{1}He$ $^{924}_{1}He$ $^{926}_{1}He$ $^{928}_{1}He$ $^{930}_{1}He$ $^{932}_{1}He$ $^{934}_{1}He$ $^{936}_{1}He$ $^{938}_{1}He$ $^{940}_{1}He$ $^{942}_{1}He$ $^{944}_{1}He$ $^{946}_{1}He$ $^{948}_{1}He$ $^{950}_{1}He$ $^{952}_{1}He$ $^{954}_{1}He$ $^{956}_{1}He$ $^{958}_{1}He$ $^{960}_{1}He$ $^{962}_{1}He$ $^{964}_{1}He$ $^{966}_{1}He$ $^{968}_{1}He$ $^{970}_{1}He$ $^{972}_{1}He$ $^{974}_{1}He$ $^{976}_{1}He$ $^{978}_{1}He$ $^{980}_{1}He$ $^{982}_{1}He$ $^{984}_{1}He$ $^{986}_{1}He$ $^{988}_{1}He$ $^{990}_{1}He$ $^{992}_{1}He$ $^{994}_{1}He$ $^{996}_{1}He$ $^{998}_{1}He$ $^{999}_{1}He$ $^{1000}_{1}He$

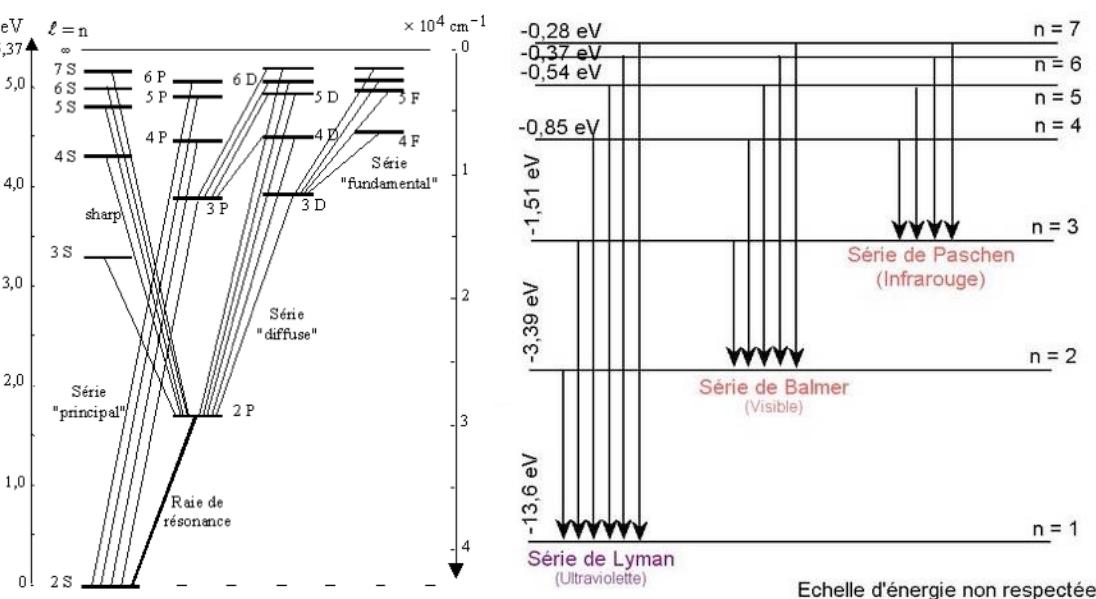
108 Éléments



$$\phi_{at} \approx 10^{-10} \text{ m}$$

[nm]

force électromagnétique (EM)

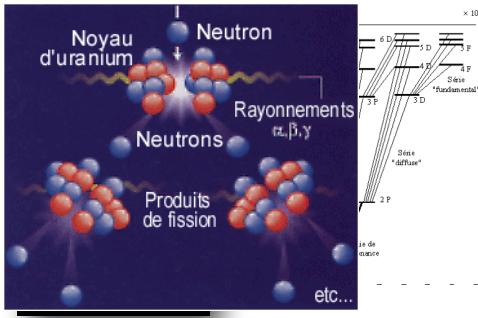


Echelle d'énergie non respectée

Ordres de grandeur en physique

Le microcosme à l'échelle nucléaire: physique nucléaire

Table of Isotopes (1998)



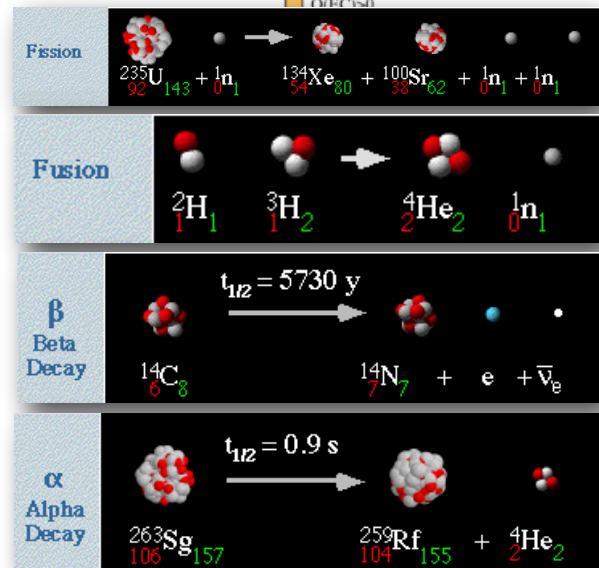
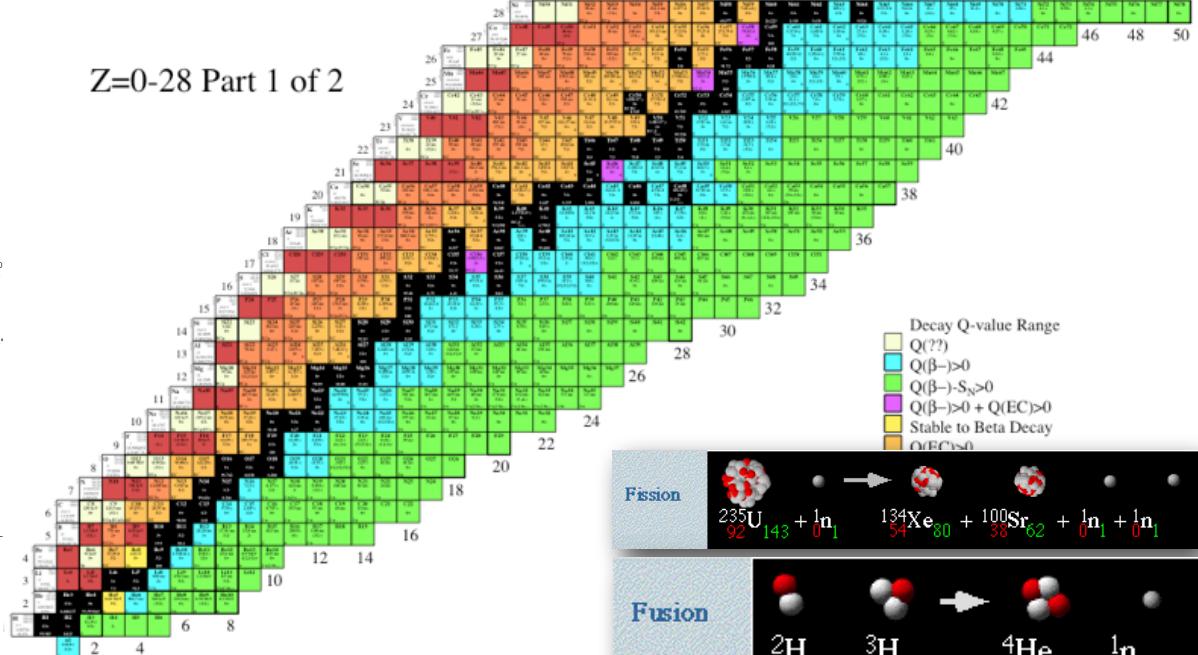
$$\phi_{noy} \cong 10^{-15} \text{ m}$$

[fm]



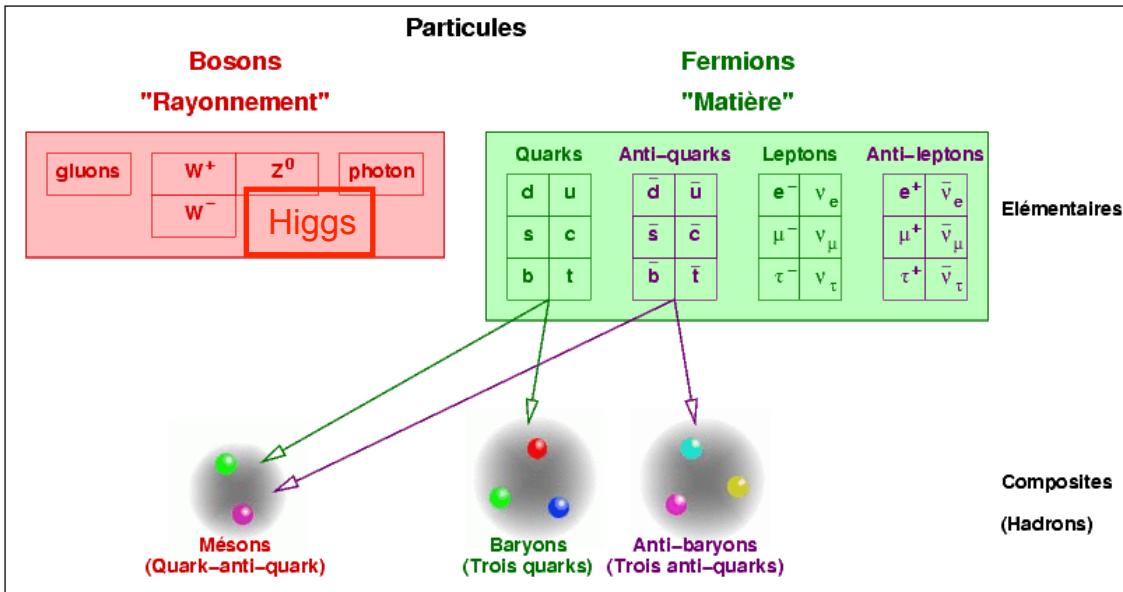
Force Forte + (EM)

Z=0-28 Part 1 of 2

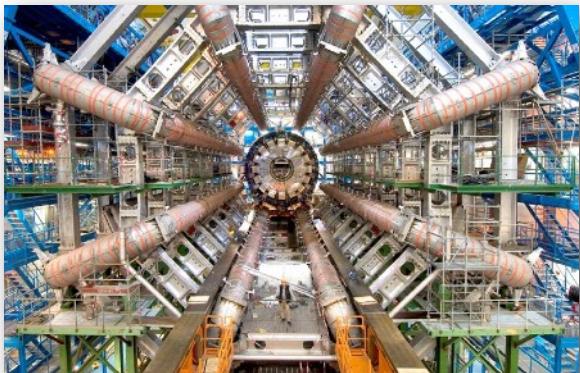


Ordres de grandeur en physique

Le microcosme à l'échelle des particules élémentaires: physique des particules



$$\left\{ \begin{array}{l} 6 \text{ leptons} \\ 6 \text{ quarks} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{photon (EM)} \\ \text{Z bosons (weak)} \\ \text{gluons (strong)} \end{array} \right\}$$



$$\phi_{bar} \cong 10^{-16} \text{ m} \quad \phi_{lept} < 10^{-18} \text{ m}$$
$$< [\text{fm}] \qquad \qquad \qquad < [\text{am}]$$

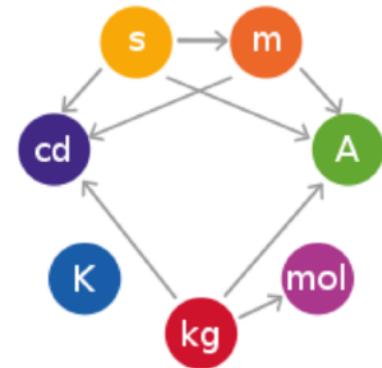


Le Système International d'Unités

Naissance du SI

18ème siècle: abondance de différentes mesures

[Vaud: 70 unités (alors que 4 étaient suffisantes !)]



1795 système métrique [m, kg, s]

1875: convention internationale du mètre (l, s, V, poids)

1901: Système de Giorgi [m, kg, s,]

1948: Système MKSA [m, kg, s, A]

1960: Système international SI [m, kg, s, A, K, Cd, mol]

20 mai 2019: Nouveau système international

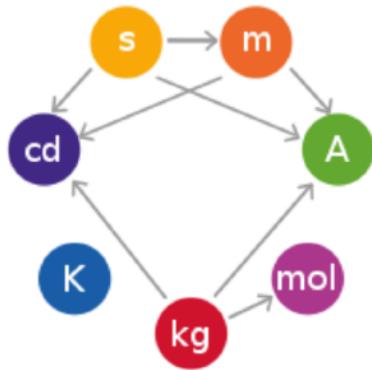
7 unités de base, dont 6 sont (**toutes**)
définies **intrinsèquement** et de
manière reproductible en laboratoire.



Le Système International d'Unités

La révolution

Paris 30 mai 1789



■ La distance

Définitions du mètre (m) :

1791 : dix-millionième partie d'un quart de méridien terrestre
(c'est de là que vient le fait que la circonférence de la Terre est 40 000 km)



*Jean-Baptiste Joseph DELAMBRE
(1747 - 1822)*



*Pierre-François MECHAIN
(1744-1804)*

*7 ans pour mesurer le ¼ de méridien (L) de
Dunkerque à Barcelone*

$$1 \text{ mètre} = 10^{-7} L$$

1889 à 1960 :

barre de platine-iridium utilisée comme étalon pour le mètre



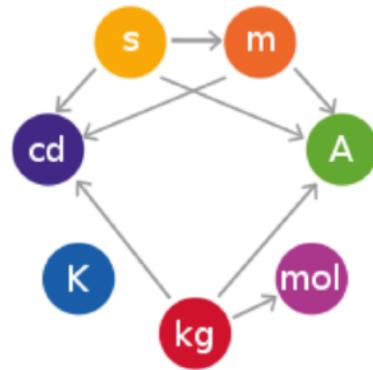
1983: distance parcourue par la lumière dans le vide en
1/299 792 458 s

Le Système International d'Unités

Les définitions du nouveau système international

Mètre

Le mètre, **m**, est l'unité de longueur ; sa valeur est définie en fixant la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide à exactement 299 792 458 quand elle est exprimée en m s^{-1} .

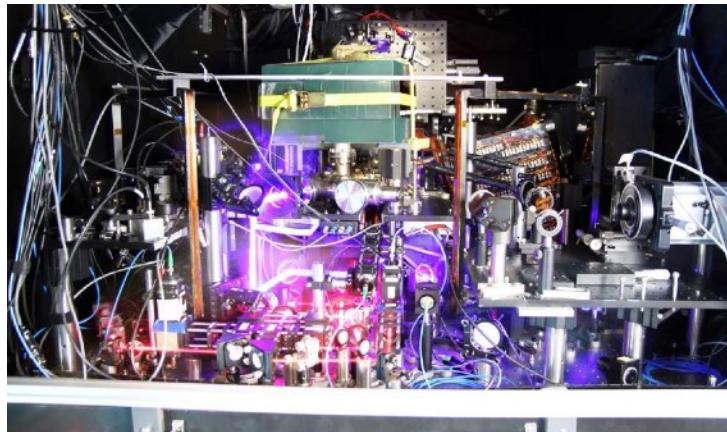


**Méthode de mesure:
optique (interférométrie)**

■ Le temps

Définitions de la seconde (s) :

- En **1791** : 1/86400 parties du jour
- En **1960**, pour tenir compte des irrégularités du mouvement de la terre, elle a été définie comme une fraction de l'année solaire 1900
- Depuis **1967**, la seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux d'énergies de l'état fondamental de l'atome de césium 133 pris à 0 K (précision actuelle 10^{-14})



Horloge atomique

Le Système International d'Unités

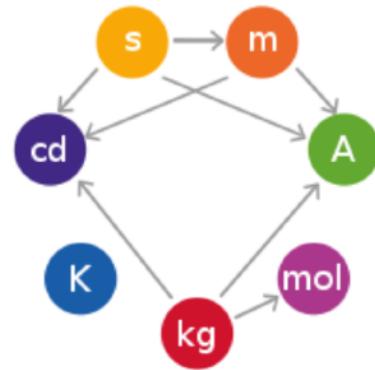
Les définitions du nouveau système international

Seconde

La seconde, **s**, est l'unité de durée ; sa valeur est définie en fixant la valeur du nombre de périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césum 133 à la température du zéro absolu à exactement $9\ 192\ 631\ 770$ quand elle est exprimée en s^{-1} .

méthode de mesure: horloge atomique

fontaine de Césium



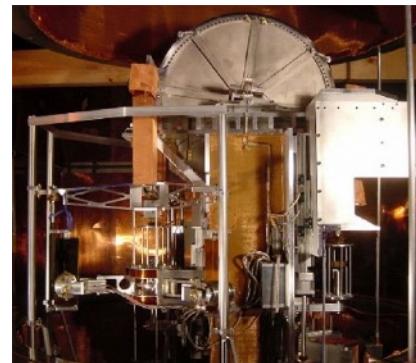
■ la masse

Définitions du kilogramme (kg) :

- Le gramme a été introduit pendant la Révolution française en **1795** (masse d'un centimètre cube d'eau à 4°C)
- **1875**, l'unité de masse fut redéfinie comme «kilogramme » (seule unité du SI incluant un préfixe multiplicateur)
- **1889**, le prototype du kilogramme (cylindre de platine iridié) est conservé au Bureau International des Poids et Mesures (Paris)
- **2019**, nouvelle définition du kg, exprimé en fonction de la constante de Planck



<https://www.bipm.org/fr/measurement-units/>



balance de Kibble

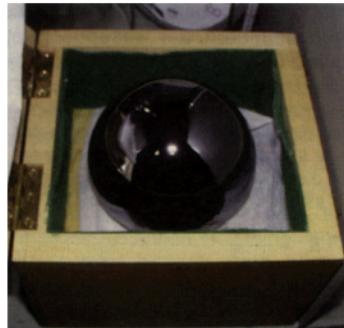
Dernière unité intrinsèque, pourquoi ?

Le Système International d'Unités

Problème de la définition intrinsèque du kilogramme!

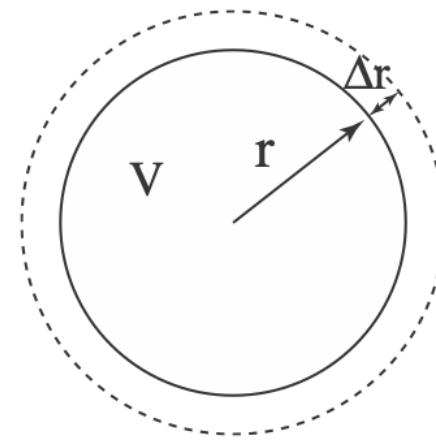


Copie de l'étalon de Sèvres



Boule de Si monocristallin
de 1 kg (usinée à <10 nm)

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\frac{4\pi r^2 \Delta r}{3} \pi r^3}{3} = 3 \frac{\Delta r}{r}$$



Pour obtenir une variation $< 10^{-8}$ sur le volume (masse) il faut:

$$\frac{\Delta r}{r} = 3 \cdot 10^{-9} \Rightarrow \Delta r = 3 \cdot 10^{-9} \cdot r$$

Considérons par exemple une boule de silicium avec $r \simeq 10$ cm

$$\Delta r = 3 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 0.3 \text{ nm} = 1 \text{ distance atomique !!}$$

=>>> Un étalon de masse de 1 kg, de précision $< 10^{-8}$, sous forme d'une boule de Silicium, nécessiterait un usinage avec une précision de 0.3 nm !!!

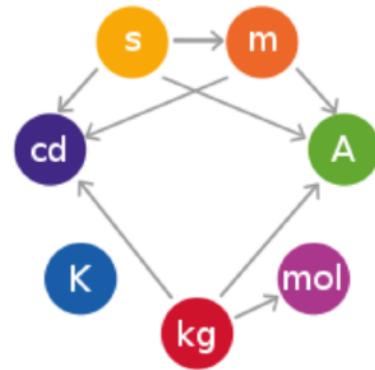
Le Système International d'Unités

Les définitions du nouveau système international

Kilogramme (nouvelle définition)

Le kilogramme, **kg**, est l'unité de masse ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la constante de Planck à exactement $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ quand elle est exprimée en $\text{s}^{-1} \text{m}^2 \text{kg}$, ce qui correspond à des J s.

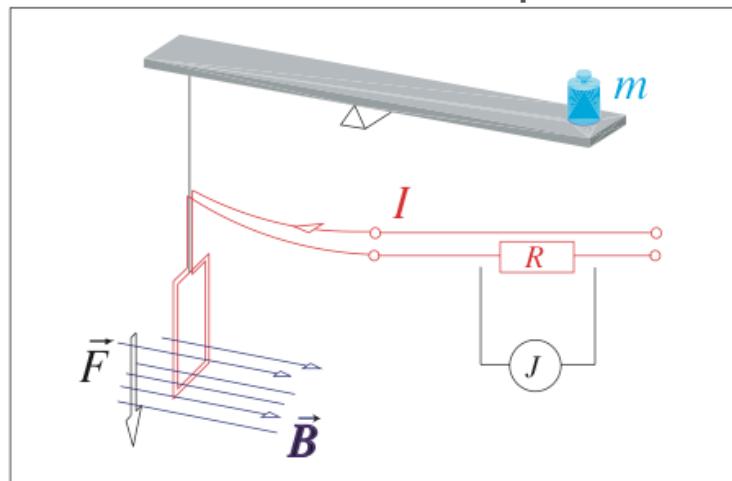
Méthodes de mesure:
Sphère de silicium !
Balance du watt



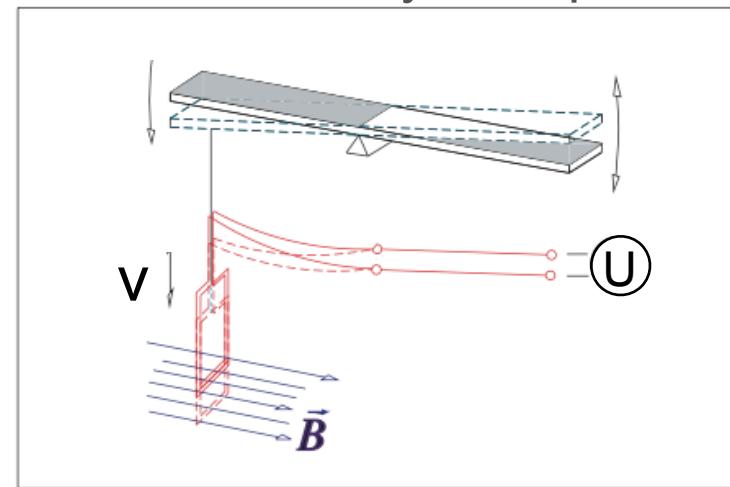
Le Système International d'Unités: la balance du Watt

Définition intrinsèque du kg avec une précision de 10^{-8} :

Mesure statique



Mesure dynamique



$$I(B \cdot l) = m \cdot g$$

$$U = V(B \cdot l)$$

\Rightarrow

$$m = \frac{U \cdot I}{g \cdot V}$$

U

mesuré par *effet Josephson*

I

mesuré par *effet Hall quantique*

V

mesuré par *interférométrie laser*

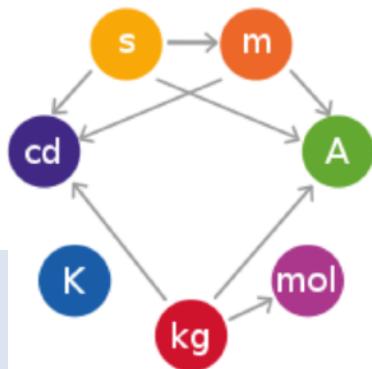
g

mesuré par *interférométrie gravimétrique*

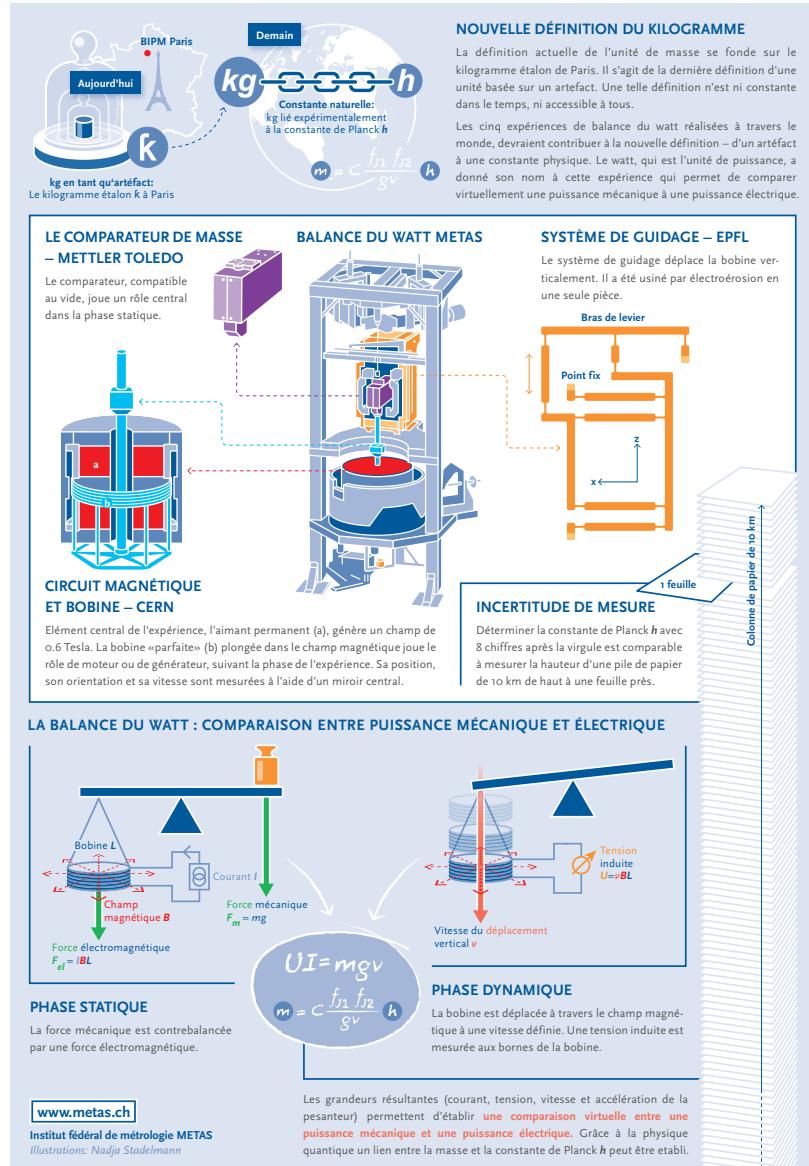
Le Système International d'Unités

Réalisation d'une balance du Watt au METAS

Office fédéral de métrologie et d'accréditation



Comment la balance du watt fonctionne

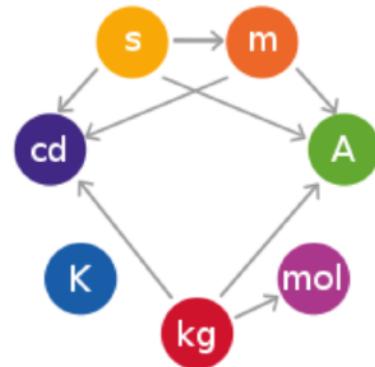


Le Système International d'Unités

Les définitions du nouveau système international

Ampère

L'ampère, **A**, est l'unité du courant électrique ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire à exactement $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ quand elle est exprimée en A s, ce qui correspond à des coulombs.



Méthode de mesure:

Loi d'Ohm : nouvelles définitions de l'Ohm et du Volt à partir de constantes fondamentales

Futur: comptage des électrons qui passent :)

Le Système International d'Unités

Les définitions du nouveau système international

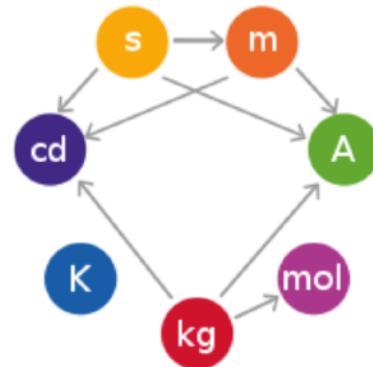
Kelvin

Le kelvin, K, est l'unité thermodynamique de température ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la constante de Boltzmann à exactement $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ quand elle est exprimée en $\text{s}^{-2} \text{m}^2 \text{kg K}^{-1}$, ce qui correspond à des J K^{-1} .

Méthode de mesure: mesure de l'équivalent énergie (kT)

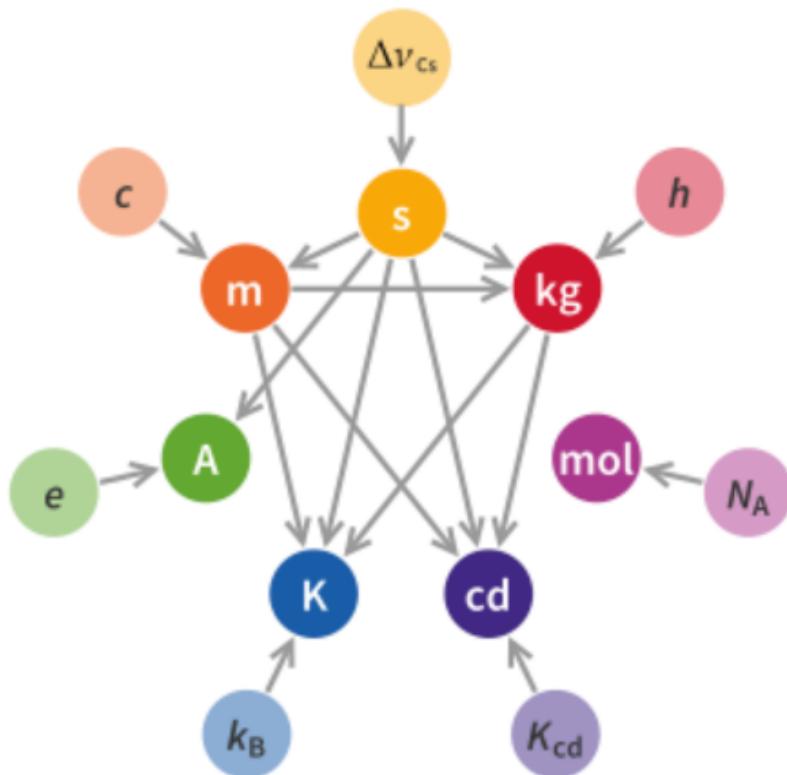
Mole

La mole, **mol**, est l'unité de quantité de matière. Sa valeur est définie en fixant la valeur numérique du nombre d'Avogadro à exactement $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ quand elle est exprimée en mol^{-1}



Le Système International d'Unités

Les définitions du nouveau système international sont basées sur la définition des constantes fondamentales



Le Système International d'Unités

Constantes fondamentales

Thermodynamique:

$$E = \frac{1}{2}m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2}kT \quad [\text{J}] = k[\text{K}]$$

Constante de Boltzmann

$$\Rightarrow k = \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right] = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

Quantum Φ :

$$E = h\nu \quad [\text{J}] = h[\text{Hz}]$$

Constante de Planck

$$\Rightarrow h = \left[\frac{\text{J}}{\text{Hz}} \right] = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{Hz}^{-1}$$

Gravitation:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad [\text{N}] = \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} \right] \left[\frac{\text{kg}^2}{\text{m}^2} \right]$$

Constante de gravitation

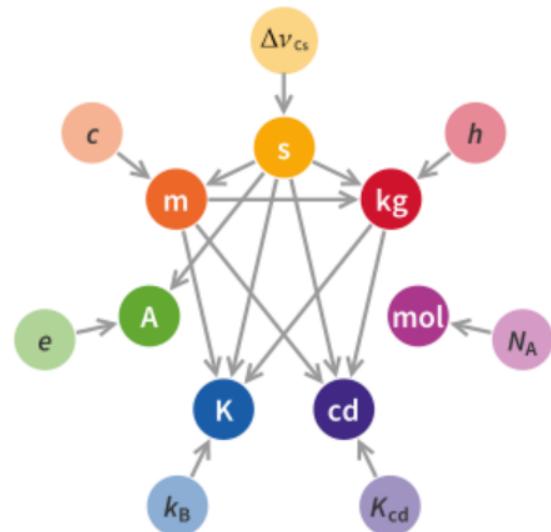
$$\Rightarrow G = 6.672 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

Electrons:

$$e/m = 1.758 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$



Constante de Von Klitzing

$$R_K = \frac{h}{e^2} = 25812.80745 \Omega$$

Le Système International d'Unités

Unités dérivées du système international

Surface:

$$S = x \cdot y = [\text{m}] \cdot [\text{m}] = [\text{m}^2]$$

Volume:

$$V = x \cdot y \cdot z = [\text{m}] \cdot [\text{m}] \cdot [\text{m}] = [\text{m}^3]$$

Vitesse:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{[\text{m}]}{[\text{s}]} = \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Accélération:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{[\text{m}]}{[\text{s}]} \frac{1}{[\text{s}]} = \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Force:

$$F = m \cdot a = [\text{kg}] \cdot \frac{[\text{m}]}{[\text{s}^2]} = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right] = [\text{N}]$$

Pression:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{[\text{N}]}{[\text{m}^2]} = \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] = [\text{Pa}]$$

Travail, énergie:

$$dW = \vec{F} \cdot \vec{dx} = [\text{N}] \cdot [\text{m}] = [\text{N} \cdot \text{m}] = [\text{J}]$$

Puissance:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{[\text{J}]}{[\text{s}]} = \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} \right] = [\text{W}]$$

Tension électrique :

$$U = \frac{P}{I} = \frac{[\text{W}]}{[\text{A}]} = \left[\frac{\text{W}}{\text{A}} \right] = [\text{V}]$$

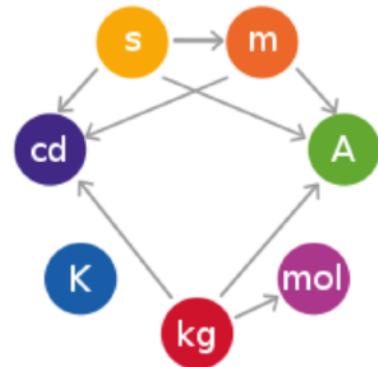
Charge électrique:

$$dQ = I \cdot dt = [\text{A}] \cdot [\text{s}] = [\text{A} \cdot \text{s}] = [\text{C}]$$

Résistance électrique:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{[\text{V}]}{[\text{A}]} = \left[\frac{\text{V}}{\text{A}} \right] = [\Omega]$$

Etc.



radian (rad)

steradian (sr)

herz (Hz)

newton (N)

pascal (Pa)

joule (J)

watt (W)

volt (V)

ohm (Ω)

siemens (S)

coulomb (C)

farad (F)

weber (Wb)

tesla (T)

henry (H)

lumen (lm)

lux (lx)

candela/m²

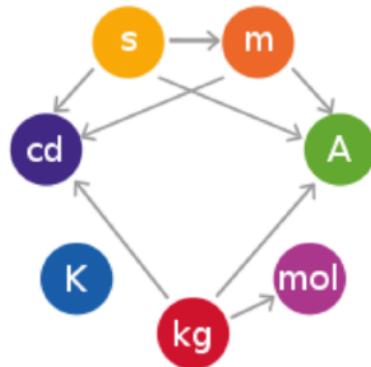
becquerel (Bq)

gray (Gy)

sievert (Sv)

Le Système International d'Unités

Préfixes du système international



Y	yotta	10 ²⁴	d	déci	10 ⁻¹
Z	zetta	10 ²¹	c	centi	10 ⁻²
E	exa	10 ¹⁸	m	milli	10 ⁻³
P	peta	10 ¹⁵	μ	micro	10 ⁻⁶
T	tera	10 ¹²	n	nano	10 ⁻⁹
G	giga	10 ⁹	p	pico	10 ⁻¹²
M	mega	10 ⁶	f	femto	10 ⁻¹⁵
k	kilo	10 ³	a	atto	10 ⁻¹⁸
h	hecto	10 ²	z	zepto	10 ⁻²¹
da	deca	10 ¹	y	yocto	10 ⁻²⁴